

**TECHNICKÁ UNIVERZITA V LIBERCI
FAKULTA STROJNÍ**



**FYZIKÁLNĚ METALURGICKÉ
ZÁKONITOSTI PRECIPITAČNÍHO
VYTVRZOVÁNÍ ODLITKŮ ZE SLITIN
HLINÍKU**

[BAKALÁŘSKÁ PRÁCE]

LIBEREC, 2009

JAROSLAV FILIP

TECHNICKÁ UNIVERZITA V LIBERCI

FAKULTA STROJNÍ

Katedra strojírenská technologie

Oddělení strojírenské metalurgie

Studijní program: B2341 - Strojírenství

**FYZIKÁLNĚ METALURGICKÉ ZÁKONITOSTI
PRECIPITAČNÍHO VYTVRZOVÁNÍ ODLITKŮ
ZE SLITIN HLINÍKU**

**PHYSICAL METALLURGY PATTERNS OF
PRECIPITATION CURING CASTING OF
ALUMINIUM ALLOYS**

Jaroslav Filip

KSP – SM – B17

Vedoucí bakalářské práce: Prof.Ing. Iva Nová, CSc.

Rozsah práce:

Počet stran textu... 39

Počet obrázků..... 16

Počet tabulek..... 10

Počet grafů 0

Počet stran příloh . 0

5.června 2009

ANOTACE
TECHNICKÁ UNIVERZITA V LIBERCI
Fakulta strojní

Katedra strojírenské technologie
Oddělení strojírenské metalurgie

Studijní program: B2341 – Strojírenství

Student: Jaroslav Filip

Téma práce: Fyzikálně metalurgické zákonitosti precipitačního vytvrzování
odlitků ze slitin hliníku.

Číslo BP: KSP-SM-B17

Vedoucí BP: Prof. Ing. Iva Nová, Csc.

Konzultant BP:

Abstrakt: Cílem této bakalářské práce je shrnutí poznatků o hliníku a jeho slitinách za účelem jejich precipitačního vytvrzování. Precipitační vytvrzování je důležité pro zvýšení mechanických vlastností odlitků ze slitin hliníku.

Abstract: The aim of this thesis is a summary of knowledge of aluminium and its alloys for the purpose of precipitation curing. Precipitation hardening is important for increasing the mechanical properties of aluminium alloy castings.

Místopřísežné prohlášení:

Místopřísežně prohlašuji, že jsem bakalářskou práci vypracoval samostatně s použitím uvedené literatury.

V Liberci, 5.června 2009

Jaroslav Filip
Nerudova ul. 707
285 04 Uhlířské Janovice

Velmi rád bych poděkoval vedoucímu mé bakalářské práce paní prof. Ing. Iva Nová,CSc. Za odbornou pomoc při konzultacích, s mojí bakalářskou prací. Také bych rád poděkoval celé katedře strojírenské technologie za vstřícnost během celé doby mého studia.

Dále bych rád poděkoval své rodině za trpělivost a podporu během celého mého studia.

Seznam použitých zkratek a symbolů

h – koeficient mezipovrchové tepelné vodivosti [$\text{W} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{K}^{-1}$],

k – součinitel přestupu tepla ochlazovaného materiálu [$\text{W} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{K}^{-1}$],

q – tepelný tok z kaleného materiálu do kalícího média [W],

A – plocha kaleného materiálu [m^2],

T₁ – teplota povrchu kaleného materiálu [K],

T₂ – teplota ochlazovacího média,

H – Grossmanův faktor [1],

např. – například,

cca – cirka,

Obsah

1. Úvod	8
2. Rešeršní část práce.....	10
2.1 Charakteristika čistého hliníku a jeho slitin	10
2.1.2 Slitiny hliníku	13
Slévárenské slitiny	
Slitiny hliníku k tváření	
2.1.3 Vliv legujících prvků na slitiny hliníku	17
2.1.4 Technologické vlastnosti hliníku	19
Slévárenské vlastnosti	
2.2 Fyzikálně metalurgické základy – precipitačního vytvrzování ..	21
2.2.1 Precipitační vytvrzování slitin hliníku	
2.3 Technické uplatnění vytvrzování slitin hliníku	34
Litá kola	
2.4 Shrnutí zákonitostí pro precipitační vytvrzování slitin hliníku ..	37
3. Závěr	38
4. Seznam použité literatury	39

1. Úvod [5,6]

Hliník byl poprvé objeven teprve na samém počátku 19. stol., v roce 1807 nebo 1808. Na jeho existenci poukázal Angličan Humhry Davy, který již předtím pozoroval rozžhavení drátu při průchodu elektrického proudu, (čímž v podstatě poukázal na využití tohoto principu při výrobě žárovek) a později zkonstruoval bezpečnostní důlní lampu. Nový prvek aluminium. Isolovat hliník se však podařilo až dánskému chemikovi Hansu Christianovi Oerstedovi v roce 1825. Výroba hliníku však byla velmi drahá, což bránilo jeho rozšíření.

Teprve v roce 1854 francouzský chemik Henry Etienne Sainte – Claire Deville, vynalezl způsob, jak průmyslovým způsobem vyrábět hliník levně. Tímto způsobem výroby bylo možné, aby cena hliníku klesla a hliník tím pádem mohl být používán ve větším měřítku. Což pro jeho výhodné mechanické vlastnosti, kterými jsou nízká hmotnost, tvárnost, odolnost proti korozi, vynikající tepelná a zejména elektrická vodivost, bylo jen dobře. Deville také upravil název hliníku na aluminium, který se dnes všeobecně používá, avšak mimo spojených států amerických, které pořád používají původní název.

I přesto, že se podařil najít způsob levnější výroby, tak se vědci snažili najít ještě levnější způsob výroby. To se podařilo francouzskému metalurgovi Paulu Louisu Héroultovi a nezávisle na něm Američanu Charlesu Martinovi Hallovi v roce 1886, kdy objevil způsob průmyslové výroby elektrolýzou. Tento princip výroby hliníku je základem výroby hliníku i dnes.

Hliník patří kromě ocelí k nejpoužívanějším kovovým konstrukčním materiálům. Dále se použití slitin hliníku dá rozdělit do dvou skupin a to z hlediska, jakou funkci má konstrukční díl například :

- Interiér – sem můžeme zahrnout součásti letadel, palubní desky, lomené podpěrky, součásti sloupu řízení, volantová kola, ramena pedálů, schránky pro air bag, rámeček pro odvod tepla z rádia, kryty rádia, součásti posuvné střechy, ramena zrcátek, schránky pro dálková světla, vnitřní rámy dveří, výztužné sloupky, odlitky pro systém ovládání oken, pro navíječe pásů.
- Exteriér – kryt motoru, střešní panely, zadní víko, vozová kola, držák chladiče, držák masky chladiče, skříň převodovky, rozdělovací převodovka,

kryty hlav válců, sací potrubí, držáky příslušenství pohonu, elektrické konektory, písty, blok motoru, olejová vana, skříň startéru a alternátoru, vodní pumpy, chladiče, střešní nosiče, ochranné tepelné štíty na výfuky, odlitky pro stěračový systém.

Surovinou pro výrobu hliníku je minerál bauxit, v čistém stavu oxid hlinitý. Z taveniny tohoto oxidu ve směsi s kryolitem se elektrolyticky získává kovový hliník. Výroba hliníku byla patentována v roce 1886 a od roku 1890 zahájena v průmyslovém měřítku. V roce 1906 byla vyvinuta první slitina hliníku, známá jako dural (AlCu4Mg). Tato slitina znamenala převrat ve stavbě letadel a vzducholodí. Dnešní základní řada nejpoužívanějších slitin hliníku je celosvětově unifikována a její vývoj je v podstatě ukončen.

Jelikož čistý hliník nevykazuje potřebné mechanické vlastnosti, tak se nejvíce používají slitiny hliníku. Slitiny hliníku mohou být dva druhy a to slitiny hliníku ke slévání a ke tváření. Pro dosažení maximálních mechanických vlastností byly vytvořeny různé metody. Jednou z metod je precipitační vytvrzování, kterým lze dosáhnout vysokých mechanických vlastností hliníkových slitin. Tyto odlitky jsou zastoupeny jak ve skupině slitin pro tváření tak i ve skupině pro slévárenské účely. Oblast slévárenských slitin zastupují např. slitiny AlSi8Cu3 , AlSi8Cu3 , AlSi7Cu2 , AlSi5Cu3 atd. Tyto slitiny lze tepelně zpracovat respektive precipitačně vytvrzovat.

Také precipitační vytvrzování se zabývá tato bakalářská práce, která má představovat ucelenou charakteristiku tohoto způsobu tepelného zpracování slitin hliníku.

2. Rešeršní část práce

Čistý hliník patří do skupiny neželezných kovů. Vyznačuje se velkou tažností, velmi dobrými plastickými vlastnostmi, jak za tepla tak za studena. Má také dobrou elektrickou vodivost. Avšak jeho pevnost je poměrně malá což má za následek, že se čistý hliník nedá využít v konstrukcích. Z toho důvodu je čistý hliník zastoupen slitinami hliníku. Tyto slitiny existují ve dvou skupinách a v každé této skupině jsou ještě rozděleny na vytvrzovatelné a nevytvrzovatelné. Výběr z těchto skupin záleží pouze na specifikaci výrobku (tím myslím jaké nároky a jakým způsobem bude výrobek vyráběn, zda-li bude odléván, tvářen nebo ho budeme lít pod tlakem). Pro dosažení maximálních možných pevnostních hodnot se používá tepelné zpracování (jinými slovy precipitační vytvrzování). Tato metoda tepelného zpracování je založena na třech postupech. V prvním postupu dochází k ohřevu na homogenizační teplotu, kdy musíme docílit toho, aby došlo k přeměně intermedieální fáze na tuhý roztok. Ve druhé fázi dochází k rychlému ochlazení, abychom získali přesycený tuhý roztok, Ve třetí fázi dochází k rozpadu přesyceného tuhého roztoku, který se vylučuje na hranicích nebo uvnitř zrn. Tomuto technologickému jevu se také někdy říká stárnutí. Tento poslední jev může probíhat při pokojové nebo při zvýšené teplotě. Pokud probíhá při pokojové teplotě tak ho nazýváme přirozené stárnutí, pokud při zvýšené teplotě tak je to umělé stárnutí. Výrobky z hliníku se používají snad ve všech odvětvích od zdravotnictví po letectví. Asi nejznámější pro nás jsou výrobky v automobilovém průmyslu jako jsou bloky motorů, litá kola.

2.1 Charakteristika čistého hliníku a jeho slitin [5]

Čistý hliník je kov bílé barvy, který se vyznačuje vysokou elektrickou a tepelnou vodivostí s poměrně vysokou hodnotou měrného tepla tání. Nejenom čistý hliník, ale i jeho slitiny se vyznačují vysokým poměrem meze pevnosti v tahu a hustoty. Hodnoty pevnostní charakteristiky lze zvýšit intenzivním tvářením. K všeobecným vlastnostem hliníku patří dobrá slévateľnost s možností dosáhnout vysoké produktivity při sériové výrobě odlitků. Dále také vysoká korozní odolnost, široká možnost povrchových úprav včetně dekorativních, nízká hmotnost odlitku, dobrá obrobiteľnost, výhodné optické vlastnosti, regulovatelná odrazivost vůči světelnému i tepelnému záření, vysoká tepelná vodivost, magnetická neutralita. Pro výrobu odlitků se zásadně používají slitiny hliníku a to z toho důvodu, že čistý hliník

je nevyhovující pro jeho mechanické vlastnosti. Pro zlepšení mechanických a technologických vlastností používáme přísadových prvků. Příkladové prvky můžeme rozdělit na hlavní a vedlejší prvky. Hlavní přísadové prvky jsou rozhodující pro určení vlastností slitiny a se základním prvkem vymezují typ slitiny, zpravidla bývá jejich obsah po základním prvku druhý nejvyšší. Mezi tyto prvky ve slévarenských slitinách hliníku patří měď, hořčík, křemík.

Fyzikální vlastnosti čistého hliníku – Hliník se vyznačuje vysokou elektrickou [$S = 62\%$ IACS] i tepelnou vodivostí [$\lambda = 247 \text{ W}\cdot\text{m}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}$] s poměrně vysokou hodnotou měrného tepla tání. Hliník krystalizuje v kubickou plošně centrovanou mřížku s teplotou tavení 660°C , hustotou [$\rho = 2699 \text{ kg}\cdot\text{m}^{-3}$] při čistotě 99,99%. V tab. 2-1 můžeme vidět další fyzikální vlastnosti čistého hliníku.

Tab. 2-1 Fyzikální vlastnosti čistého hliníku [1]

Vlastnosti	Hodnoty
Latentní teplo tavení	$397 \text{ kJ}\cdot\text{kg}^{-1}$
Latentní teplo varu	$10.78 \text{ MJ}\cdot\text{kg}^{-1}$
Atomová hmotnost	26.98154
Objemová změna při krystalizaci	6.5%
Specifické teplo	$0.900 \text{ kJ/kg}\cdot\text{K}$ (při 25°C) $1.18 \text{ kJ/kg}\cdot\text{K}$ (při 660.4°C)
Teplota supravodivosti	1.2 K
Účinný průřez pro neutrony	0.2b/atom pro energii neutronu 0.02 V 0,65b/atom pro energii neutronu 100 MV

Pro technické použití hliníku je důležitá teplotní roztažnost. Hodnoty teplotní roztažnosti čistého hliníku v závislosti na teplotě jsou uvedeny v tab. 2-2.

Tab. 2-2 Hodnoty teplotní roztažnosti čistého hliníku [1]

Teplotní interval [$^\circ\text{C}$]	Průměrný koeficient [$\mu\text{m/m}\cdot\text{K}$]
- 200 až 20	18.0
- 150 až 20	19.9
- 50 až 20	21.8
20 až 100	23.6
20 až 200	24.5
20 až 300	25.5
20 až 400	26.4
20 až 500	27.4

Uvedené fyzikální vlastnosti se využívají v jednotlivých oborech. Například účinný průřez pro neutrony se využívá v aplikaci slitin v jaderné energetice, elektrická vodivost v elektrotechnice, tepelná vodivost v energetickém průmyslu.

Chemické vlastnosti čistého hliníku – Hliník je kov neušlechtilý, který je na vzduchu poměrně stálý. Jeho atomové číslo je 13 a atomová hmotnost 26,98. Hliník tvoří s kyslíkem stabilní oxid Al_2O_3 . Oxidická vrstva brání hloubkové oxidaci a zajišťuje velmi dobrou odolnost proti povětrnostním vlivům. Chemická odolnost ve vodních roztocích velmi závisí na pH elektrolytu. V rozmezí pH 4,5 až 8,5 je tato odolnost výborná, v zásaditém rozmezí jen omezená. Příčinou je tvorba tenké a kompaktní vrstvy oxidu hlinitého, která brání dalšímu přístupu kyslíku. Oxidickou vrstvu lze elektrolyticky dále zesílit eloxováním, čímž se ochranné účinky zlepší a povrch získá i zvýšenou tvrdost. Vysoké afinity hliníku ke kyslíku se využívá rovněž při průmyslové výrobě některých kovů redukcí z jejich oxidů.

Mechanické vlastnosti čistého hliníku - Mechanické pevnostní vlastnosti patří díky velkému praktickému významu, mezi nejčastější kritéria, podle kterých se rozhodujeme o vhodnosti či nevhodnosti daného materiálu pro jeho použití. Ve spoustě případů jsou zajisté potřeba znát i další znalosti o dalších vlastnostech, ať už fyzikálních (elektrická a tepelná vodivost, korozní odolnost) nebo únavových (rychlost šíření únavové trhliny, vysokocyklová únava). Skoro vůbec se, ale nemůžeme setkat s tím, že by mechanické vlastnosti nehráli žádnou roli. Mezi základní mechanické vlastnosti lze zařadit zkoušky tahem, tlakem, zkoušky tvrdosti a zkoušky rázem v ohybu (vrubová houževnatost). Nejčastější a nejběžnější používané jsou zkouška tahem a měření tvrdosti. Definice těchto mechanických zkoušek i způsob provedení zkoušek tahem, tvrdosti či rázem v ohybu jsou uvedeny v evropských normách převzatých do českých norem ČSN EN 10 002-1, ČSN EN 10 003-1, respektive ČSN EN 10 045-1. Na tyto normy samozřejmě navazují další normy, které souvisí s ověřováním a kalibrací zkušebních strojů a zařízení.

Technologické vlastnosti čistého hliníku - Soubor fyzikálních a mechanických vlastností materiálů, které umožňují vyrobit definovaným způsobem zpracovaný výrobek, nazýváme technologickými vlastnostmi materiálu. Mezi nejdůležitější technologické vlastnosti lze zařadit slévatelnost, tvárnost, svařitelnost a obrobitelnost. Vhodnost daných procesů k určitému způsobu technologického zpracování nebo účelu použití daného výrobku se hodnotí speciálními zkouškami,

které musí dát reprezentativní a reprodukovatelné výsledky. Tyto speciální zkoušky jsou obvykle součástí dodacích podmínek zákazníka nebo firem.

2.1.2 Slitiny hliníku [1,4,3]

Z důvodu, že čistý hliník nevykazuje potřebné mechanické vlastnosti. Z toho důvodu se používají slitiny hliníku. Tyto slitiny se dají rozdělit do dvou skupin a to slitiny ke slévání a slitiny k tváření. Obě tyto skupiny se dají ještě rozdělit na vytvrditelné a nevytvrditelné. V tab. 2-3 jsou uvedeny slitiny hliníku slévárenské a v tab. 2-4 jsou uvedeny slitiny hliníku k tváření.

Tab. 2-3 Slévárenské slitiny hliníku [3]

Typ	Slitina	R _m (MPa)	Použití
Nevytvrditelné	AlSi13Mn	140 až 240	Složitě, tenkostěnné korozivzdorné odlitky
	AlSi10Mn	150 až 190	Méně náročné odlitky, dobrá obrobitelnost.
	AlSi5Cu4Zn	150 až 180	Méně náročné odlitky, malá korozivzdornost
	AlSi8Cu2Mn	220 až 260	Odlitky pro motorová vozidla
Vytvrditelné	AlSi10MgMn	160 až 300	Značně namáhané korozivzdorné odlitky
	AlSi7Mg	200 až 280	Dynamicky namáhané součásti korozně odolné
	AlSi12CuMgNi	160 až 300	Písty motorových vozidel
	AlMg10	180 až 280	Vysoce korozně odolné odlitky, nádobí

Tab. 2-4 Slitiny hliníku k tváření [3]

Typ	Slitina	R _m [MPa]	Významné vlastnosti	Hlavní použití
Nevytvrditelné	AlMn1	110 až 200	Odolnost proti korozi	Chemie, letectví
	AlMg3	200 až 400	Dobrá odolnost proti korozi i mořské vodě, leštitelnost, dobré mechanické vlastnosti	Potravinařství, chemie, stavba lodí
	AlMg5			
	AlMg7			
	AlMg4,5Mn1			

Vytvřovatelné	AlMgSi0,5 AlMgSi1	100 až 200 280 až 330	Snadná zpracovatelnost, schopnost povrchových úprav, dobrá el. Vodivost	Stavebnictví, elektrotechnika
	AlCu4Mg AlCu4Mg1	400 až 480	Nebezpečí koroze, obtížné svařování, dobré únavové vlastnosti	Běžná slitina pro strojírenství i letectví
	AlCuMgPb	300 až 360	Schopnost obrábění na automatech	Běžná slitina pro strojírenství
	AlCu2Ni	400 až 450	Dobré mechanické vlastnosti i za zvýšených teplot	Výkovky, písty, ojnice
	AlZn6MgCu AlZn5Mg2	450 až 550	Velmi dobré mechanické vlastnosti i ve svarech, stálost na vzduchu, nebezpečí koroze za napětí	Letectví, běžné konstrukce, dopravní prostředky, stavebnictví

Slévárenské slitiny lze podle [tab. 2-3] rozdělit do těchto skupin:

- **Slitiny typu Al – Si:** tyto slitiny se používají tehdy, když potřebujeme dobrou slévateľnost a odolnost proti korozi. Obsah křemíku se pohybuje u těchto slitin mezi 5 až 13 %. Podle obsahu křemíku je rozdělujeme na podeutektické – ty musí obsahovat křemíku pod 12 %, eutektické – kolem 12 % křemíku, nadeutektické – nad 12 % křemíku.
- **Slitiny typu Al-Mg:** tyto slitiny mají velmi dobrou odolnost vůči mořské vodě. Tím mám na mysli, že dobře odolávají korozi. Nejlepší odolnost vůči korozi vykazují slitiny, vyrobené z vysokočistých surovin. Jsou svařovatelné a mají i dobrou mechanickou obrobiteľnost. V architektuře se dají tyto slitiny dobře využít, protože se u jejich odlitků dá realizovat eloxování. Nevýhodou těchto slitin je špatná slévateľnost a náchylnost hořčíku k oxidaci v procesu tavení. Představiteli těchto slitin u nás jsou například ČSN 42 4515 – slitina AlMg5Si1Mn (4.40 – 5.50 % Mg, 0.60 – 1.50 % Si, 0,25 – 0,6 % Mn) a ČSN 42 4519 – slitina AlMg10SiCa (7.00 – 10.00 % Mg 0.01 – 2.00 % Si, 0.01 – 0.15 % Ca).

- **Slitiny typu Al – Zn – Mg:** pro tyto slitiny je typické, že mají dobrou pevnost již v litém stavu, taky se vyznačuje dobrou odolností vůči korozi (ne za napětí). Pokud je třeba tepleného zpracování není nutné tak drastické ochlazování po rozpouštěcím žhání jako je tomu i jiných slitin hliníku a maximální pevnosti lze dosáhnout po 20 až 30 dnech přirozeného stárnutí což je výhodné z hlediska ekonomického. Nevýhodou těchto slitin je jejich špatná slévatelnost a náchylnost k tvorbě trhlin za tepla.
- **Slitiny typu Al – Sn:** tyto slitiny obsahují zhruba 6 % Selenu (Sn) a malým množstvím mědi (Cu) a niklu (Ni). Prvky mědi a niklu jsou ve slitině z toho důvodu aby zvýšily její pevnostní vlastnosti. Tato slitina se speciálně využívá pro výrobu kluzných ložisek. Z hlediska slévatelnosti je s touto slitinou problém pro její velký interval krystalizace a také možnost segregace selenu (Sn).
- **Al – Mg – Si:** slitiny tohoto typu patří mezi významné slitiny pro tváření. Jejich malý obsah legujících prvků nám sice neumožňuje dosáhnout maximální pevnosti, ale na druhou stranu mají tyto slitiny dobrou odolnost vůči korozi a jsou schopny povrchových úprav. S těmito slitinami se často setkáme ve stavebnictví a i v architektuře, protože patří mezi nejběžnější slitiny. Předností těchto slitin je i snadná zpracovatelnost jak za tepla tak i za studena, což umožňuje i výrobu složitých profilů výtlačným lisováním za větších rychlostí. Při malém obsahu hořčíku a křemíku (0,5 až 1 %) se slitiny často používají i v elektrotechnice, přičemž vhodným poměrem legujících přísad i zpracováním lze dosáhnout zvýšené pevnosti při malém poklesu elektrické vodivosti.
- **Al – Cu – Mg:** předností této slitiny je její přirozené stárnutí, které však omezuje možnost plastické deformace po rozpouštěcím žhání. Tím mám na mysli, že se může jen v určitém časovém limitu tvarovat, rovnat a podobně. Velký vliv na mechanické vlastnosti má kromě obsahu mědi i obsah hořčíku. Při menším obsahu hořčíku a mědi jsou i mechanické vlastnosti nižší a zpomaluje se i pochod stárnutí. Nevýhodou této slitiny je malá odolnost vůči korozi. Z toho důvodu se plechy plátují jednostranně nebo oboustranně čistým hliníkem, nebo slitinou hliníku s malým obsahem hořčíku nebo manganem do

0,8%. Tloušťka plátovací vrstvy bývá 2,5 až 7,5% tloušťky plechu. Tyče nebo profily se neplátují.

- **Al – Zn – Mg:** U tohoto typu slitiny je obsah Zn (zinku) omezen maximálně na 7%. Pevnost této slitiny významně ovlivňuje také obsah Mg (hořčíku), který je od 1 do 2%. Důležitý je nejen obsah zinku a hořčíku, ale také jejich poměr. Ve velkém rozsahu lze měnit nejen mechanické vlastnosti, ale také citlivost ke korozi za napětí. Často se přidává i měď (do 2%), která zlepšuje pevnost ve vytvrzeném stavu, ale má špatný vliv, protože ovlivňuje korozní praskání. U všech slitin probíhá stárnutí za vyšších teplot. Předností této slitiny je její malá citlivost na rychlost ochlazování při rozpouštěcím žíhání. To umožňuje dosáhnout i ve svařech mechanických vlastností podobných jako v základním materiálu. Slitiny pro svařování však nesmějí obsahovat měď.

Slitiny hliníku k tváření [3]

V poslední době se u řady vytvrzovatelných slitin hliníku i v průmyslovém měřítku začíná užívat tepelně mechanického zpracování např. vložení plastické deformace mezi rozpouštěcí žíhání a stárnutí. Zlepšuje se tím mírně pevnost, ale zejména plastické vlastnosti slitiny, přičemž významně mohou být ovlivněny i únavové vlastnosti.

Nikl ve slitinách hliníku zvyšuje pevnost, zejména za zvýšených teplot. Obsah bývá 1 až 2% a v kombinaci s mědí, popř. hořčíkem, tvoří slitiny používané na výkovky pracující za tepla. Příznivé mechanické vlastnosti po umělém stárnutí lze využívat do teplot 150 až 200 °C.

Slitiny hliníku s hořčíkem se nevytvrzují, i když charakter rovnovážného diagramu tento pochod nevylučuje. Je to zejména proto, že i při velmi rychlém ochlazení se dosáhne malého stupně přesycení a při stárnutí se pevnost jen málo zvýší. U těchto slitin je obsah křemíku omezen na maximální množství 9%, i když rozsah tuhého roztoku je širší. Hlavní příčinou omezování obsahu hořčíku je zhoršená tváritelnost za tepla i za studena. Slitiny se 7% hořčíku se velmi rychle zpevňují za studena a jejich zpracování je obtížné. Slitiny Al – Mg mají výbornou odolnost proti korozi, zejména v mořské vodě, a jsou významným konstrukčním materiálem i ve strojírenství a chemii.

Poslední skupinou jsou slitiny hliníku s manganem - Mangan zvyšuje pevnost, tvárnost i odolnost proti korozi. Protože v tuhém stavu se v hliníku málo rozpouští, je obsah manganu ve tvářených slitinách omezen na 1 až 1,5%. Slitiny tohoto složení se používají náhradou za čistý hliník tam, kde jsou požadavky větší pevnost i dobré chemické stálosti.

2.1.3 Vliv legujících prvků na slitiny hliníku [4]

Cu (měď) – je legován za účelem zvýšení pevnostních vlastností – vytvrzování. Ale zase snižuje odolnost proti korozi. V technických slitinách je legován spolu s hořčíkem.

Si (křemík) – hlavní legující prvek pro slévárenské slitiny Al – Si (siluminy). U slitin série 6xxx, které jsou označovány dle EN 573-1, jsou díky přítomnosti Mg_2Si schopný vytvrzení. Jsou to slitiny určené pro tváření.

B (bor) – přidává se do hliníku a to z důvodu zlepšení, spíše zjemnění struktury. Zvýšení elektrické vodivosti u technicky čistého Al v důsledku precipitace V, Ti, Cr, Mo z tuhého roztoku α . Zvyšuje schopnost Al zachytávat neutrony.

Bi (bismut) – je legován za účelem zlepšení mechanické obrobitelnosti.

Sb (antimon) – zvyšuje odolnost vůči korozi v mořské vodě. Snižuje náchylnost vůči Al – Mg slitin ke vzniku trhlin za tepla. U ložiskových slitin je legován v množství 4 – 6 %.

Cr (chrom) – tento prvkem aplikujeme za účelem snížení náchylnosti k růstu zrn u Al – Mg slitin. Ztížení procesu rekrystalizace u Al – Mg – Si a Al – Mg – Zn slitin. U vytvrditelných slitin zvyšuje kalitelnost.

Co (kobalt) – u některých slitin Al – Si s přítomností Fe je legován za účelem transformace jehlicovité β fáze bohaté na Fe na kulovitou morfológii. Tím se u těchto slitin zvyšují pevnostní i plastické vlastnosti.

Fe (železo) – je to běžná nečistota u Al. Rozpustnost v tuhém stavu je nízká ($\sim 0,04\%$), v důsledku čehož je ve struktuře přítomen jako intermetalická sloučenina s Al, resp. v kombinaci s jinými prvky. U slitin typu Al-Cu vytvořením intermetalické fáze Al_7FeCu_2 dochází k ochuzení tuhého roztoku α o měď, a tím i ke snížení pevnostních vlastností. Blokuje růst zrna v případě disperzně vyloučených bohatých

částic na Fe ve struktuře. Slitin typu Al – Cu – Ni zvyšuje pevnostní vlastnosti za zvýšených teplot a creep.

Pb (olovo) – je toxickým prvkem. Je doposud aplikován jako legující prvek s cílem zlepšit mechanickou obrobitelnost. U slitin Al – Cu – Mg může být příčinou vzniku trhlin za tepla v důsledku segregace v průběhu krystalizace.

Li (lithium) – je legujícím prvkem u slitin, jsou to třeba slitina Al – Cu – Mg – Li. Jedná se o slitiny, kde jsou díky přítomnosti koherentních precipitátů LiAl_3 pevnostní vlastnosti i modul E vysoké. Jelikož se jedná o legující prvek s nízkou specifickou hmotností, jsou jím současně legovány „lehčí“ slitiny.

Mg (hořčík) – tímto prvkem se legují především slitiny série 5xxx, které jsou označovány dle EN 573-3. Když dojde k vyloučení precipitátu typu Mg_5Al_8 na hranicích zrn, slitina se stává náchylnou k interkrystalickému porušení a ke interkrystalické korozi. Je běžným legujícím prvkem u slitin typu Al – Cu – Mg (série 2xxx, která se označuje dle EN 573-3) a Al–Mg–Si (série 6xxx, která se označuje dle EN 573-3) u kterých se podílí především na zvýšení pevnostních vlastností.

Mn (mangan) – tento prvek je legován za účelem :

- Zvýšení pevnostních vlastností,
- Zvýšení teploty rekrystalizace,
- Zjemnění zrna,
- blokování růstu zrn v případě jeho vyloučení ve formě disperzních precipitátů,
- zvýšení citlivosti k ochlazování,
- potlačení vyloučení Fe v destičkovitém tvaru a vytvoření intermetalické fáze $(\text{Fe}, \text{Mn}) \text{Al}_6$. U slitin série 3xxx je hlavním legujícím prvkem.

Mo (Molybden) – v ojedinělých případech je legován v množství do 0,3% s cílem zjemnění struktury.

Ni (Nikl) – jeho rozpustnost je v tuhém stavu je méně než 0,04%. U slitin typu Al – Cu a Al – Si je legován za účelem zvýšení pevnostních vlastností za vyšších teplot, snížení koeficientu teplotní roztažnosti a zlepšení odolnosti vůči korozi. U slitin pro jadernou energetiku je jeho přítomnost nežádoucí v důsledku jeho vysoké absorpce neutronů.

P (fosfor) – u nadeutektických slitin Al – Si může být aplikován jako modifikátor.

Ag (stříbro) – v množství 0,1 – 0,6 % významně zvyšuje odolnost vůči korozi za napětí slitin typu Al – Zn – Mg při současném zvýšení pevnostních vlastností.

Sr (stroncium) – je aplikován u slévárenských slitin Al – Si za účelem modifikace Si.

Sn (Cín) – je hlavní legující prvek pro ložiskové slitiny Al – Sn. Malé množství Sn (0,05%) u slitin typu Al – Cu zvyšuje jejich citlivost ke stárnutí za vyšších teplot – zvyšuje rychlost procesu a také zvyšuje pevnostní vlastnosti. Na druhé straně je třeba říci, že vyšší koncentrace než 0,05% způsobuje vznik trhlin za tepla u slitin typu Al – Cu a zhoršuje odolnost vůči korozi.

Ti (Titan) – je legován spolu s B za účelem zjemnění struktury – tvorba jemných intermetalických částic TiB_2 – a to již v průběhu krystalizace. Je přítomen také v drátech po sváření.

Zn (Zinek) – je hlavní legující prvek tepelně zpracovatelných slitin série 7xxx, které se označují dle EN 573-3. V součinnosti s Mg vytváří intermetalickou fázi $MgZn_2$. Tyto slitiny se používají pro tváření.

Zr (Zirkonium) – je legován u některých slitin v množství 0,1 – 0,3%. Vytváří jemné precipitáty, které blokují procesy zotavení a rekystalizace. U slitin typu Al – Zn – Mg je legován s cílem získání jemné struktury u odlitků. Je také legován ke slitinám vykazujícím efekt superplasticity s cílem zachování jemné struktury (jemnozrnná struktura).

2.1.3 Technologické vlastnosti hliníku [3,7]

Pro zpracování slitin hliníku jsou velmi důležité jejich vlastnosti především slévárenské vlastnosti.

Slévárenské vlastnosti - Slévatelnost by se měla odvozovat od tekutosti roztavených kovů a slitin, ale jelikož se hodnoty těžko zjišťují a málo charakterizují praxi tak z toho důvodu se za rozhodující pokládají zkoušky zabíhavosti, dokonalosti vyplnění formy a náchylnosti k praskání za tepla. Tekutost se dá z fyzikálního hlediska pokládat za převrácenou hodnotu dynamické viskozity, ale u roztavených kovů je třeba s pojmem tekutosti spojovat širší význam než podmínky vnitřního tření u pohybujících se částic taveniny. Viskozita roztavených kovů je velmi nízká a srovnatelná s viskozitou vody. Tato viskozita se s teplotou poměrně málo mění a má i malý význam na slévárenské vlastnosti. Slévatelnost může být ovlivněna povrchovým třením. Hodnoty povrchových napětí jsou uvedeny v tab. 2-5. S teplotou hodnota povrchového napětí klesá. Vysoká teplota má za následek,

že tavenina špatně zatéká do kanálků a tím se zhoršují slévárenské vlastnosti. Vliv povrchového napětí bývá často zastíněn působením tenkých kyslíčnickových vrstev, které vznikají na povrchu tavenina a také významně zhoršují slévatelnost. Také obsah plynů a kovů má vliv na slévárenské vlastnosti tak i na jakost odlitku.

Tab. 2-5 Povrchová napětí některých kovů [3]

Kov	Teplota (°C)	Povrchové napětí $\sigma \cdot 10^3$ (N.m ⁻¹)
Sb	640	350
Bi	269	378
Pb	327	452
Sn	232	526
Cd	320	630
Zn	419	758
Ag	998	923
Cu	1 131	1 103
Au	1120	1 128

Zabíhavost patří mezi nejběžnější technologické zkoušky a má na ní vliv licí teplota, složení slitiny, měrné teplo, tepelná vodivost a skupenské teplo tání i nečistoty. Velký vliv má i teplota formy a jakost povrchu jejích stěn. I male množství legujících prvků dokáže změnit zabíhavost slitiny a mít vliv i na krystalizaci. Viskozita nemá na zabíhavost vliv. Povrchové napětí má vliv jen tehdy kdy je tavenina vlévána do malých rozměrech vtoků a při malé rychlosti lití. V praxi se používá spirálová zkouška zabíhavosti, u které se posuzuje délka spirály vyplněná kovem. Nejvyšší zabíhavost je u čistých kovů. U tuhých roztoků je zabíhavost značně malá a zvýší se jen blízko u eutektika nebo u tuhých slitin s úzkým intervalem tuhnutí. Zabíhavost eutektických slitin může být dokonce lepší než u čistých kovů.

Zabíhavost – je to schopnost tekutého kovu při odlévání dobře vyplnit dutiny formy, musí dobře zabíhat. Závisí to také na vlastnostech použité slitiny, na podmínkách lití (gravitační, odstředivé, pod tlakem). Zabíhavost lze zvýšit vyšší teplotou lití (pro odlitky s malou tloušťkou stěny volíme vyšší licí teplotu i než pro tlustostěnné odlitky). Avšak licí teplotu nelze zvyšovat neúměrně dlouho, jelikož dochází ke vzniku pórovitosti odlitků. Příznivě na zabíhavost působí předeřívání formy. Nejlepší zabíhavost mají slitiny eutektického složení a to AlSi12, AlSi10 a pístová slitina AlSi12CuNiMg.

Sklon k trhlinám a prasklinám slitin hliníku – trhliny se tvoří při teplotách vyšších jen v intervalu tuhnutí. Vznikají po hranicích zrn a nejsou doprovázeny zvukovými efekty. Sklon ke vzniku trhlín se zmenšuje v závislosti na intervalu doby tuhnutí a na velikosti zrna, čím je zrno jemnější, tím je sklon menší. Praskliny vznikají za teplot podstatně nižších a to v důsledku pnutí v odlitcích, které vznikají při chladnutí. Na tvorbu prasklin působí zpomalení chladnutí, souměrná konstrukce odlitku a usnadnění deformace odlitku. Ze slévárenského hlediska jsou nejvýhodnější slitiny eutektického složení nebo s malým intervalem tuhnutí.

2.2 Fyzikálně metalurgické základy – precipitačního vytvrzování [1]

Vytvrzování hliníkových slitin bylo jedním z prvních předmětů výzkumu po zavedení elektronové mikroskopie. Jak metody difrakce rentgenových paprsků, tak i elektronová mikroskopie ukázaly, že ve všech soustavách schopných precipitačního vytvrzování, nejen u hliníkových slitin, má počáteční precipitát jinou strukturu než rovnovážná fáze. Místo toho probíhají při stárnutí reakce v tomto pořadí : zóny – přechodný precipitát – rovnovážný precipitát. Toto pořadí se zachovává proto, že rovnovážný precipitát je nekoherentní s matečním krystalem, zatímco přechodové struktury jsou buď dokonale koherentní, jak je tomu u zón nebo alespoň částečně koherentní. Z toho vyplývá, že povrchová energie a deformační energie u precipitačních reakcí prochází soustavou uvedenou pořadím stavů, aby ve všech stádiích precipitace měla nejnižší volnou energii.

Povrchová energie má vliv na proces nukleace za té podmínky, že energie rozhraní je velká. To znamená, že krystalová struktura na rozhraní mezi zárodkem a matečním krystalem není nespojitá, takže v tu chvíli mluvíme o něčem analogickém s hranicí zrna. Z toho důvodu se při nekoherentním způsobu nukleace musí zárodky překročit určitou minimální velikost nutnou pro vzniknutí částic nové fáze. Aby nedocházelo k tomuto pomalému způsobu precipitace, vzniká občas místo nekoherentního precipitátu koherentní, pro něhož je tento rozměrový jev málo podstatný. Podmínky koherence vyžadují, aby rovnovážná mřížka precipitátu byla deformována tak, aby svojí velikostí byla přizpůsobena mřížce matečního tuhého roztoku, nebo se precipitát vyloučí s metastabilní mřížkou. Poněvadž tato metastabilní přechodná struktura má jak objemovou volnou energii, tak i deformační

energii vyšší než rovnovážný precipitát. Je to následkem její nižší energie rozhraní, což způsobuje, že je přechodná struktura stabilnější v raných stádiích precipitace.

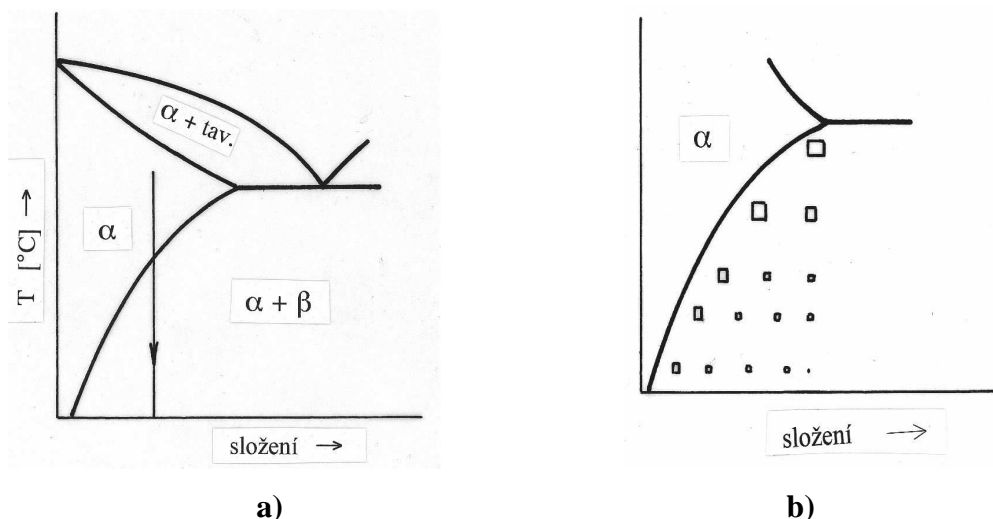
Nastane-li případ, že se precipitát stává nekoherentní, tak většinou dochází k tomu, že slitina má potřebu snížit energii rozhraní na nejmenší možnou mez tím, že přizpůsobí orientace mezi precipitátem a matečným krystalem tak, že atomové roviny rovnoběžné s hraniční plochou mají v obou krystalech podobné mezirovinové vzdálenosti. Pro tyto plochy je typické, že čím je krystalografické přizpůsobení obou mřížek lepší, tím je nižší jejich distorze na rozhraní, a tedy také nižší povrchová energie.

Pořadí precipitace v různých fázích se nám odrazí na tvaru křivek při stárnutí. Jednotlivé zóny jsou podle definice koherentní s matečným krystalem, a pokud vznikají, tak se pevnostní vlastnosti hliníku a jeho slitin zvyšují. Přechodný precipitát může být koherentní s maticí α , v takovém případě by došlo ke zvýšení pevnostních vlastností, nebo částečně koherentní, což by mohlo mít za následek jak zvýšení, tak i snížení pevnostních vlastností. Rovnovážný precipitát je nekoherentní a jeho vznik, vždy souvisí a vede ke snížení pevnostních vlastností. Některé hliníkové slitiny, které jsou schopny precipitačního vytvrzování jsou uvedeny v tab. 2-6. V této tabulce jsou současně uvedeny rovnovážné precipitáty neboli intermediální fáze, které se vylučují při rozpadu příslušného přesyceného tuhého roztoku.

Tab. 2-6 Slitiny schopné precipitačního vytvrzování [1]

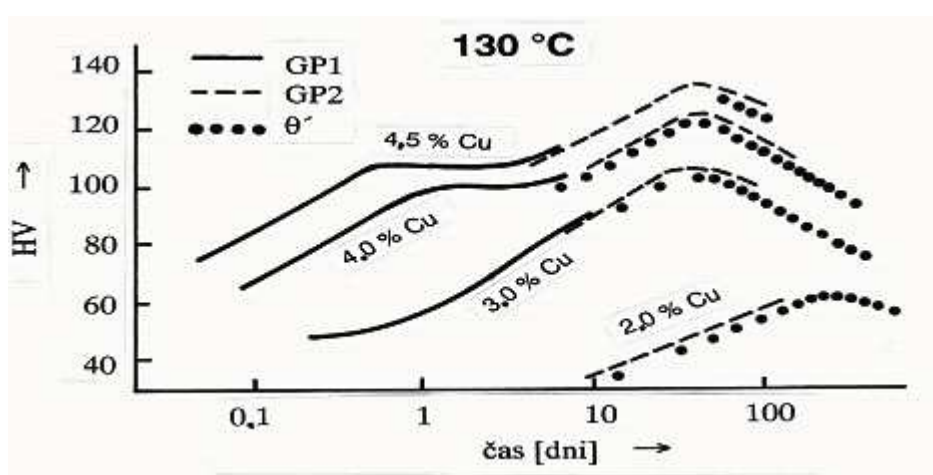
Základní kov	Legující kov	Přechodný precipitát	Rovnovážný precipitát
Al	Cu	1. Destičkové zóny GP I. bohaté na Cu na rovinách $\{100\}_{Al}$ 2. Uspořádané zóny GP II. 3. Fáze Θ'	Θ (Al_2Cu)
	Ag	1. Kulovité zóny bohaté na Ag 2. Destičky hexagonální γ' na $\{111\}_{Al}$	γ (Ag_2Al)
	Mg, Si	1. GP zóny bohaté Mg a Si na rovinách $\{100\}_{Al}$ 2. Destičky hexagonální γ' na rovinách $\{111\}_{Al}$	β (Mg_2Si)
	Mg, Cu	1. GP zóny bohaté na Cu a Mg na rovinách $\{100\}_{Al}$ 2. Destičky fáze S' na rovinách $\{021\}_{Al}$	S (Al_2CuMg)
	Mg, Zn	1. Kulovité zóny bohaté na Mg a Zn 2. Destičky hexagonální fáze M' na rovinách $\{111\}_{Al}$	M (Mg_2Zn)

Základním požadavkem na slitinu schopnou precipitačního vytvrzování je to, aby její mez rozpustnosti v tuhém stavu snižovala s klesající teplotou. Schématicky znázorňující vliv teploty precipitačního vytvrzování respektive stárnutí na velikost částic, je zřejmé z obr. 2-1 b).

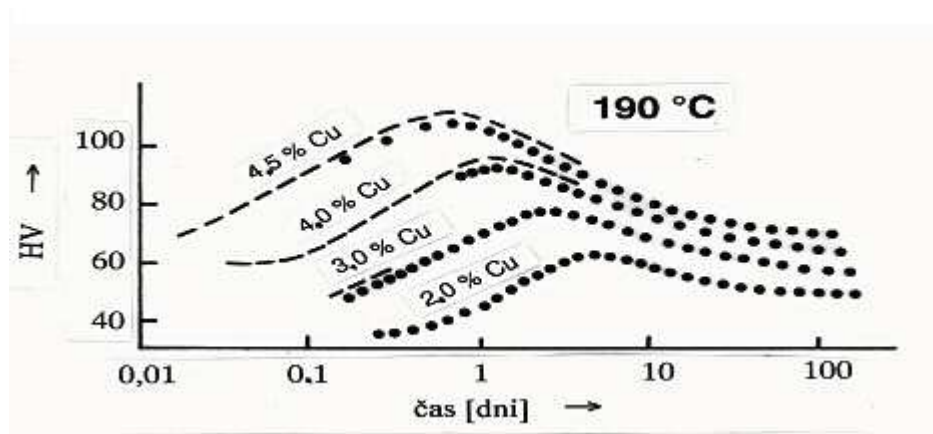


Obr. 2-1 Část rovnovážného diagramu a vyznačené oblasti vhodné pro precipitační vytvrzování. [1]

Z hlediska využití již dosažených poznatků v praxi je nutné vědět vliv doby stárnutí k získání jednotlivých precipitátů, a tím i na pevnostní vlastnosti u jednotlivých slitin. U binárních slitin to vidíme na obrázku 2-2 a 2-3. Na těchto obrázcích jsou uvedeny závislosti tvrdosti na čase při různých teplotách ohřevu po homogenizaci a rychlém ochlazení vytvrditelných materiálů slitin hliníku.



Obr. 2-2 Schéma závislosti tvrdosti na čase (při teplotě 130°C) [1]



Obr. 2-3 Schéma závislosti tvrdosti na čase (při teplotě 190°C) [1]

2.2.1 Precipitační vytvrzování slitin hliníku [1]

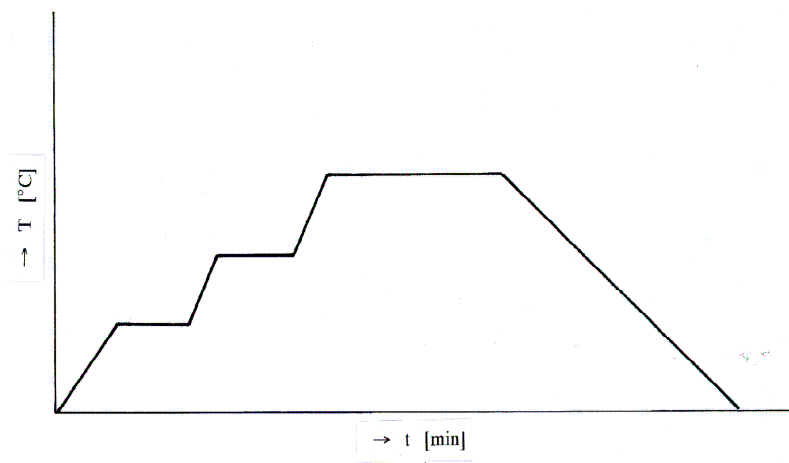
Vytvrzováním se dají ve značném rozsahu měnit mechanické, fyzikální i technologické vlastnosti slitin. Hlavní zásadou je, že tyto slitiny mají z hlediska daného rovnovážného diagramu výraznou změnu rozpustnosti legujících prvků nebo prvků na teplotě. Změna rozpustnosti v tuhém roztoku α je tím pádem základním požadavkem, aby mohlo dojít ke vzniku přesyceného tuhého roztoku α . O čem jsme se bavili v kapitole 2.2.

Vytvrzování je proces, který se skládá ze dvou částí, které na sebe navazují a vzájemně spolu souvisí až do té míry, že každé jednotlivé provedení, ovlivňuje konečný výsledek precipitace. Skládá se tedy z :

- **Ohřev na homogenizační teplotu** – což je ohřev daného materiálu na vhodnou homogenizační teplotu (kdy dochází ke vzniku homogenního tuhého roztoku), výdrž na této teplotě po dobu nezbytně nutnou na přeměnu jedné nebo více intermetalických fází na tuhý roztok.
- **Rychlé ochlazení** - rychlé ochlazení a to buď kritickou nebo až nadkritickou rychlostí, abychom získali přesycený tuhý roztok α , který je přesycen o intermediální fázi Al_2Cu . Kritická rychlost ochlazování je to nejmenší rychlost z homogenizační teploty, kdy nenastává rozpad přesyceného tuhého roztoku.
- **Rozpad přesyceného tuhého roztoku (technologicky se označuje stárnutí)**
Je to proces, při kterém dochází ke změně substrukтуры a tím i ke změně

mechanických, technologických a fyzikálních vlastností. Stárnutí může probíhat, buď za pokojové teploty – takové stárnutí nazýváme přirozené, nebo za zvýšené teploty – což je umělé stárnutí.

Občas se můžeme střetnout s takzvaným stupňovitým stárnutím. Tento typ stárnutí probíhá, po homogenizačním žíhání, kdy se využívá dvou nebo více teplot, které se při tomto cyklu zvyšují. Schéma trojstupňového stárnutí je na obr. 2-4

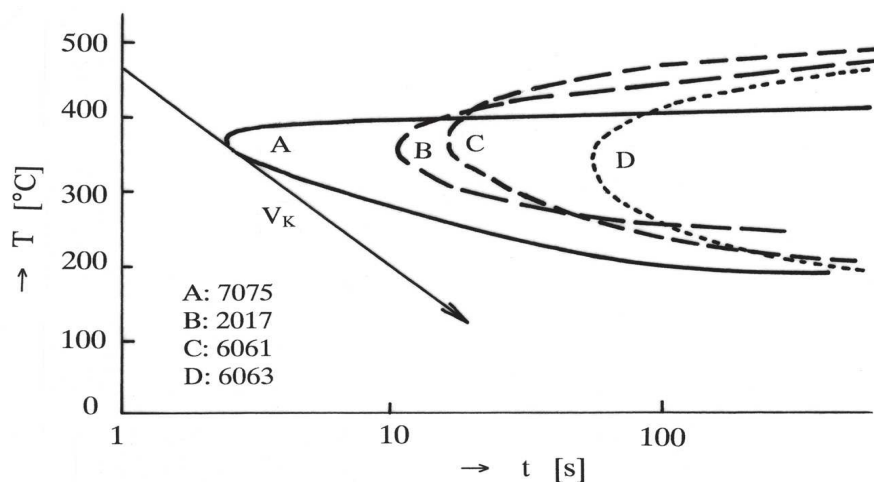


Obr. 2-4 Schéma trojstupňového způsobu precipitačního vytvrzování [1]

V souvislosti s kritickou rychlostí ochlazování – v_k – je nutno se zmínit o „C“ křivkách, které se uplatňují v technologii tepelného zpracování Al slitin.

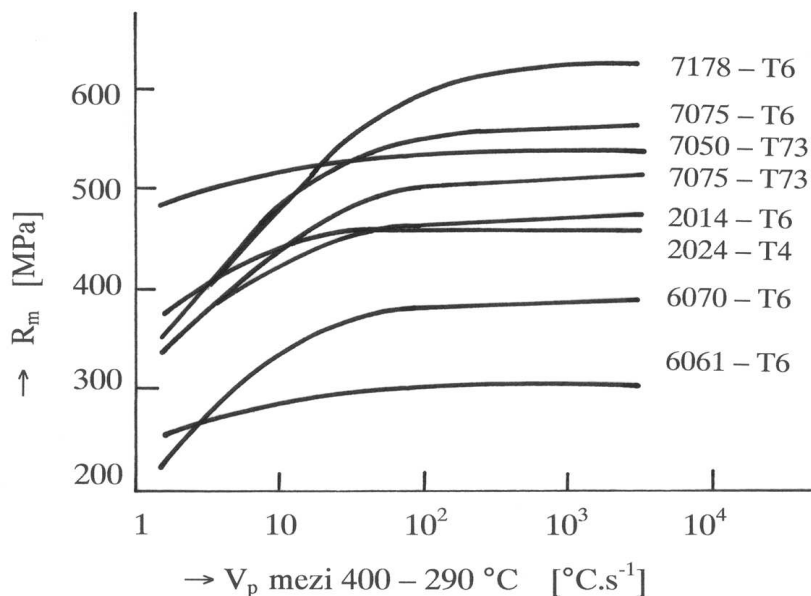
V této souvislosti je nutno konstatovat, že známější je vytvrzování slitin hliníku určených pro tváření. V tomto smyslu byly prováděny i potřebné výzkumy, které přinesly další informace o této problematice. Na obr. 2-5 jsou uvedeny C křivky pro čtyři slitiny hliníku určené pro tváření, které se v zahraničí označují EN AW 7075, EN AW 2017, EN AW 6061, EN AW 6063. Na tomto obrázku je současně vyznačená kritická rychlost ochlazování (v_k). Teoreticky, při uplatnění této rychlosti ochlazování vytvrzované slitiny hliníku lze dosáhnout pevnost v tahu, která představuje 0,95 R_m , [1], tato publikace však neuvádí konkrétní hodnotu R_m .

Přesto, že vytvrzování slitin hliníku pro tváření není předmětem mé bakalářské práce, přesto domnívám, že následně uváděné skutečnosti jsou vhodné, neboť mechanismu precipitace a další vlivy jsou stejné u všech vytvrzovaných slitin hliníku. Naopak je možno konstatovat, že publikace, týkající se slévárenské problematiky, resp. precipitačního vytvrzování slitin hliníku fyzikální podstatu vytvrzování téměř neuvádí.



Obr. 2-5 Schéma kritické rychlosti ochlazování pro čtyři slitiny [1]

Na obr. 2-6 jsou souvislosti mezi průměrnou ochlazovací rychlostí $100\text{ }^{\circ}\text{C.s}^{-1}$ (pro interval 400 až $290\text{ }^{\circ}\text{C}$) a mezí pevnosti vybraných slitin hliníku při různém způsobu tepelného zpracování. Z obrázku je patrné, že vyšší hodnoty pevnosti souvisí nejen se způsobem tepelného zpracování, ale také s typem slitiny hliníku.



Obr. 2-6 Schéma kritické rychlosti ochlazování pro čtyři slitiny [1]

Pro vyjádření vztahu mezi ochlazovacím prostředím a ochlazovaným materiálem se používá Grossmanův faktor H , který je definován vztahem:

$$H = \frac{h}{2 \cdot k} \quad [1], \quad (1)$$

kde: h – koeficient mezipovrchové tepelné vodivosti [W.m⁻².K⁻¹],

k – součinitel přestupu tepla ochlazovaného materiálu [W.m⁻².K⁻¹].

Koeficient mezipovrchové tepelné vodivosti, lze vyjádřit vztahem:

$$h = \frac{q}{A \cdot (T_1 - T_2)} \quad [\text{W.m}^{-2}.\text{K}^{-1}] \quad (2)$$

kde: q – tepelný tok z kaleného materiálu do kalícího média [W],

A – plocha kaleného materiálu [m²],

T_1 – teplota povrchu kaleného materiálu [K],

T_2 – teplota ochlazovacího média.

Hodnoty H i při konstantním ochlazovacím médiu, závisí také na jeho teplotě a rychlosti proudění. Čím je Grossmanův faktor větší, tím intenzivněji je materiál ochlazován. Pro ilustraci jsou v tab. 2-7 uvedeny hodnoty pro slitinu EN AW 7075 – plechy o tloušťce 75 mm.

Tab. 2-7 Hodnoty Grossmannova faktoru pro slitinu hliníku EN AW 7075 [1]

Ochlazovací médium	Teplota ochlazovacího média [°C]	Rychlost proudění média [m.s ⁻¹]	Grossmannův faktor (H) [1]
voda	27	0	1,07
voda	27	0,5	1,55
voda	38	0	0,99
voda	38	0,5	1,48
voda	60	0	0,86
voda	60	0,5	1,33

Z dané tabulky nám vyplývá, že při konstantním médiu, což je v tomto případě voda a zároveň materiálu má na velikost Grossmannova faktoru vliv teplota ochlazovacího média a rychlost proudění média.

Ochlazování z teploty homogenizačního ohřevu závisí na volbě ochlazovacího média. Pro jednotlivá média je rychlost ochlazování při nulovém proudění uvedena v tab. 2-8.

Tab. 2-8 Rychlost ochlazování při nulovém proudění [1]

Ochlazovací médium	Rychlost ochlazování [°C.s ⁻¹] (pro interval teplot 300 – 200 °C)
Voda 18 °C	600
Voda 26 °C	500
Voda 50 °C	100
10 % vodní roztok NaOH	1.200
10 % vodní roztok NaCl	1.100
Olej 18 °C	~ 100

Pokud ochlazujeme a ochlazovaný materiál vkládáme do chladícího média, což při precipitačním vytvrzování odlitků ze slitin hliníku bývá voda o teplotě cca 20 až 50 °C. Při ponoření do média dochází k tomu, že ochlazovaný materiál má daleko vyšší teplotu, než je teplota bodu varu média, což má za následek, že se na povrchu vytváří pára, kterou je třeba průběžně odstraňovat. To znamená, že je zapotřebí neustálá cirkulace chladícího média. V tab. 2-9 jsou uvedeny ochlazovací rychlosti při různých rychlostech proudění ochlazovacího média.

Tab. 2-9 Ochlazovací rychlosti při různých rychlostech proudění [1]

Ochlazovací médium	Nulová rychlost proudění média [m.s ⁻¹]	Rychlost proudění média [m.s ⁻¹]
Voda 18 °C	600	2.400
10 % roztok NaCl	1.200	6.000
Olej 18 °C	~ 100	~ 110
Vzduch 18 °C	~ 20	~ 50

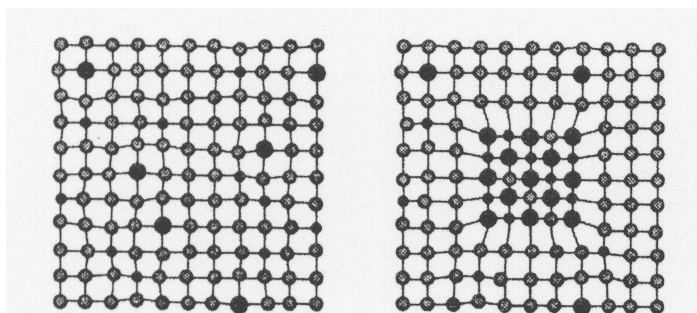
Jak z literatury [1] vyplývá, rychlost kterou budeme ochlazovat materiál z homogenizační teploty má vliv i na korozní vlastnosti materiálu. Někdy je též důležité, především u odlitků malých rozměrů, sledovat i bortění, které vzniká při ochlazování.

Z výše uvedeného vyplývá, že rychlým ochlazením odlitku zahřátého na homogenizační teplotu vzniká přesycený tuhý roztok, který je typický pro takto zpracovaný odlitek.

Po realizaci homogenizačního ohřevu a rychlého ochlazení následuje stárnutí, resp. precipitační vytvrzování. U některých slitin precipitační vytvrzování již probíhá při pokojové teplotě, jsou to zejména slitiny typu Al-Cu-Mg, tento děj se také někdy v literatuře označuje jako přirozené stárnutí. V podstatě to je rozpad přesyceného tuhého roztoku. V některých případech, kdy je třeba precipitační vytvrzování urychlit (pro přehled vlastností, včetně vlastností získaných precipitačním vytvrzováním odlitku), pak se provádí ohřev odlitku z příslušné slitiny hliníku na vyšší teplotu (cca 160 °C), čímž se rozpad přesyceného tuhého roztoku urychlí. V literatuře tento proces se také označuje jako umělé stárnutí.

Z hlediska fyzikálně metalurgického, je možno na schématu krystalické mřížky hliníku naznačit výsledek procesu ke kterému přispěl rozpad přesyceného tuhého roztoku. Rozpad se děje tím, že dochází k difúzi přísadového prvku (např. Cu) do mikroskopických míst struktury hliníku bohatších na tento prvek, čímž v těchto místech vznikají zárodky fáze (např. Al_2Cu). Růstem těchto zárodků vznikají návazné (koherentní) vyloučeniny (precipitáty). Precipitáty vznikají v určitých krystalografických rovinách základního tuhého roztoku (α) a označují se jako Guinierovy-Prestonovy zóny (pásma).

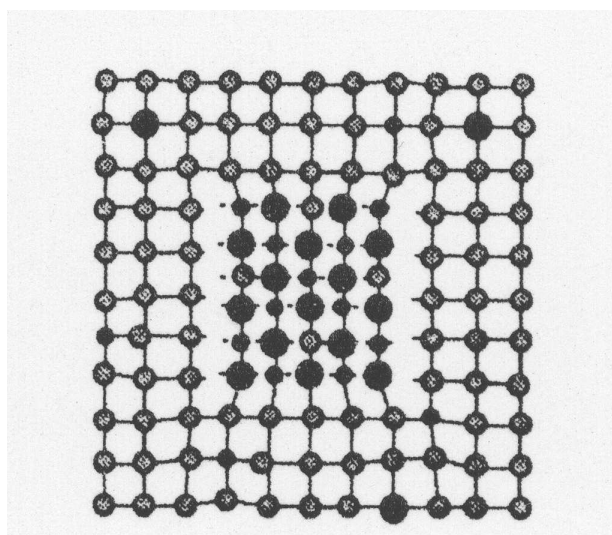
Na obr. 2-7 je uvedeno schéma rozpadu přesyceného tuhého roztoku hliníku.



(vlevo – struktura přesyceného tuhého roztoku, vpravo – struktura přesyceného tuhého roztoku s koherentním precipitátem)

Obr. 2-7 Schéma krystalické mřížky přesyceného tuhého roztoku hliníku [7]

Guinier-Prestonovy (GP) zóny mají destičkové uspořádání vytvrzujícího prvku o tloušťce 10^{-9} až 10^{-10} m a jsou součástí krystalické mřížky tuhého roztoku. GP zóny mřížku trochu deformují a vyvolávají vnitřní pnutí, tato pnutí jsou příčinou zvýšení pevnosti a tvrdosti takto precipitačně vytvrzené hliníkové slitiny. V dalším časovém okamžiku se koherence začíná postupně ztrácet a tato fáze (např. Al_2Cu) začíná tvořit samostatné útvary, které přestávají být návazně propojené s původní mřížkou přesyceného tuhého roztoku a začínají vznikat semikoherentní (částečně návazné) částice, které jsou z části spojené s mřížkou tuhého roztoku, viz obr. 2-8.

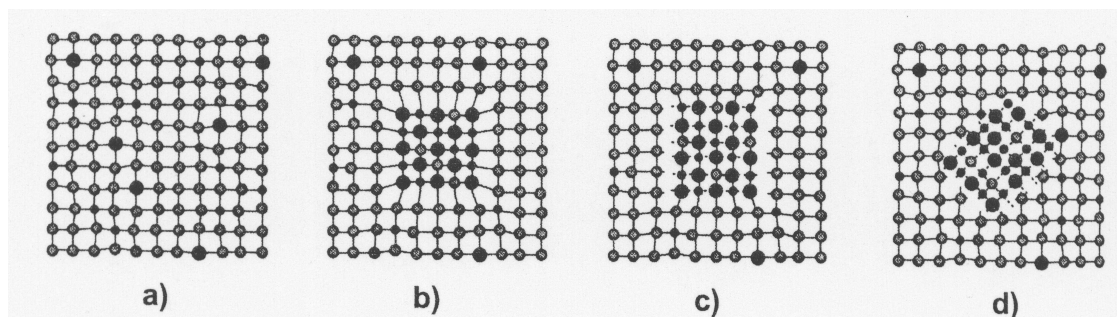


Obr. 2-8 Struktura semikoherentního precipitátu v mřížce přesyceného tuhého roztoku α (Al) [7]

Tento proces je doprovázen dalším zvýšením pevnosti a tvrdosti a lze říci, že zvýšenou tvrdost a pevnost vytvrzené slitiny hliníku způsobuje koherentní a semikoherentní vyloučení intermetalické fáze přísadového prvku, resp. Al_2Cu .

Pokud se při vytvrzování použije příliš vysoká teplota nebo dlouhá doba homogenizačního ohřevu, hliníková slitina ztrácí koherentní a semikoherentní vyloučení intermediální fáze, vzniká nekoherentní vyloučení intermetalické fáze (nekoherentní precipitát) a slitina ztrácí pevnost a tvrdost, to lze označit jako nedokonalé precipitační vytvrzení hliníkové slitiny.

Na obr. 2-9 je schéma krystalických mřížek slitiny hliníku, které jednotlivě uvádí představu o dílčím průběhu precipitačního vytvrzování z hlediska fyzikálně-metalurgického hlediska.

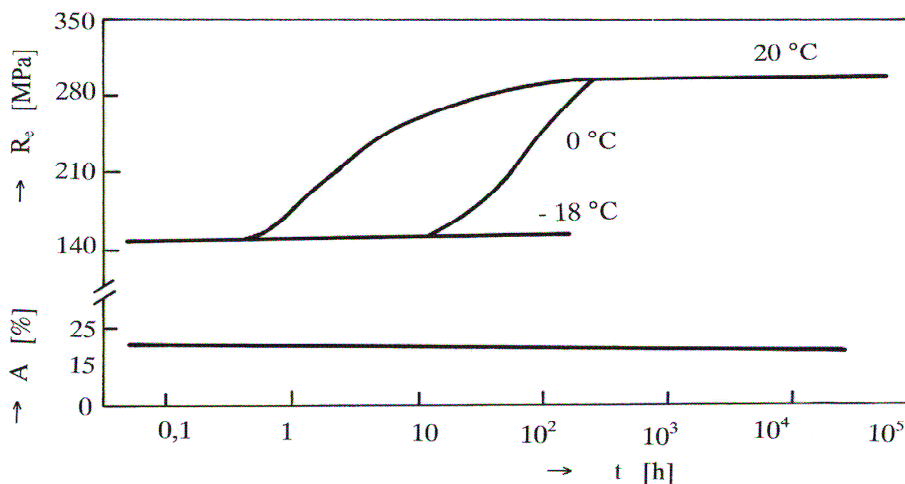


- a) struktura přesyceného tuhého roztoku (atomy hliníku, atomy Cu – tmavé body)
- b) struktura přesyceného tuhého roztoku s koherentním precipitátem
- c) struktura přesyceného tuhého roztoku s semikoherentním precipitátem
- d) struktura přesyceného tuhého roztoku s nekoherentním precipitátem

Obr. 2-9 Schéma způsobů vyloučení (precipitace) intermediální fáze (např. Al_2Cu) v mřížce přesyceného tuhého roztoku α (Al) [7]

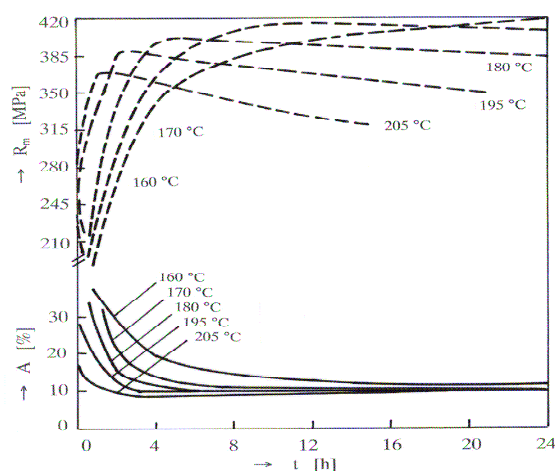
Precipitačním vytvrzováním, resp. stárnutím, můžeme dosáhnout maximálně možných pevnostních vlastností, specifické pro každou slitinu. Doba, za kterou se přesycený tuhý roztok rozpadne, závisí především na chemickém složení slitiny. Můžeme říct, že od získání přesyceného tuhého roztoku až po získání požadovaných vlastností, dochází neustále k vnitřním změnám a v tomto důsledku i ke změnám mechanických, fyzikálních, korozních i technologických vlastností. Tyto permanentní změny jsou nazývány kinetikou rozpadu.

Z technologického hlediska je tedy znalost křivek kinetiky rozpadu pro tu kterou slitinu nesmírně důležitá. Podle nich lze určit přenosnou teplotu a čas nutný pro získání požadovaných vlastností. Na obr. 2-10 je viditelná kinetika rozpadu přesyceného tuhého roztoku a slitiny AlCu4Mg1.



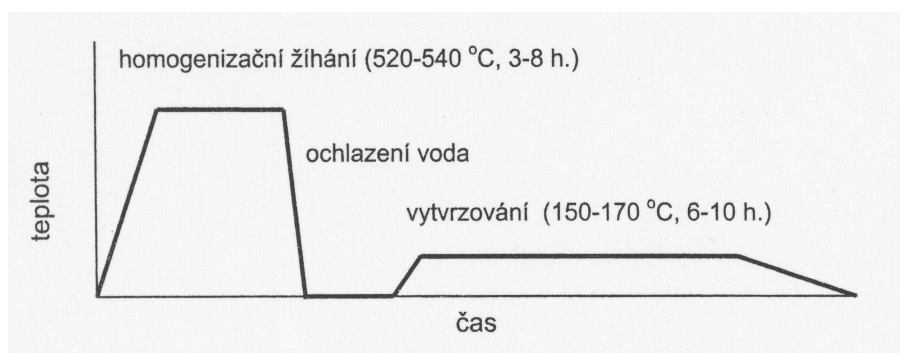
Obr. 2-10 Schéma kinetiky rozpadu přesyceného tuhého roztoku slitiny AlCu4Mg1 [1]

Z obrázku jsou patrné některé důležité informace obecně platné pro všechny vytvrditelné slitiny hliníku. Kinetika rozpadu přesyceného tuhého roztoku se při záporných hodnotách neuskutečňuje. Kinetika rozpadu přesyceného tuhého roztoku při 0 °C je opožděná, rozpad tuhého roztoku závisí na typu slitiny. Na obr. 2-11 jsou křivky pevností a tažností slitiny AlCuMg, při různých teplotách ohřevu (umělé stárnutí).

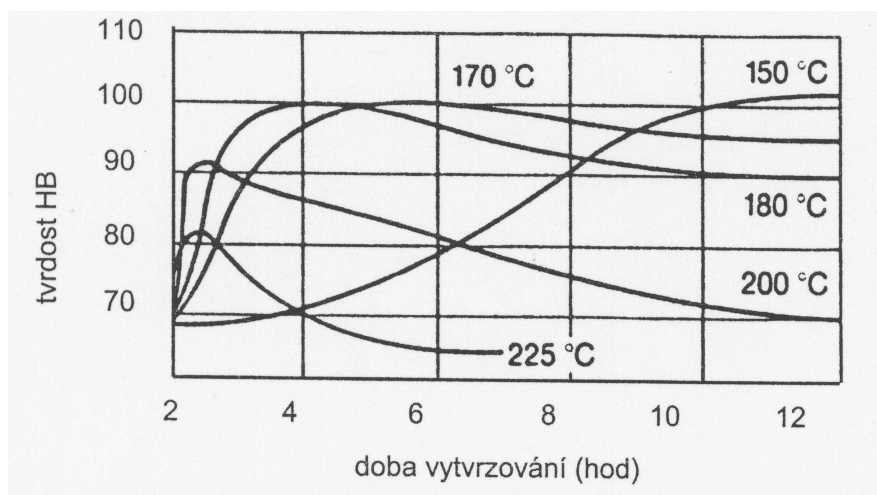


Obr. 2-11 Schéma křivek pro jednotlivé teploty umělého rozpadu tuhého roztoku [1]

Pro slitinu AlSi10MgMn , která se uplatňuje při výrobě odlitků pro precipitační vytvrzování je postup vytvrzování při vyšší teplotě než pokojové patrný z obr. 2-12. Homogenizační teplot je 520 až 540 °C, rychlé ochlazení ve vodě a ohřev na teplotu precipitačního vytvrzování činí 150 až 170 °C, doby výdrže je závislá na velikosti odlitku a množství odlitků vkládaných do pece (cca 6 až 10 h). Na obr. 2-13 jsou uvedeny hodnoty závislosti tvrdosti vytvrzované slitiny AlSi10Mg na teplotě ohřevu a čase precipitačního vytvrzování.



Obr. 2-12 Ukázka časové závislosti teplot při vytvrzování hliníkové slitiny [7]

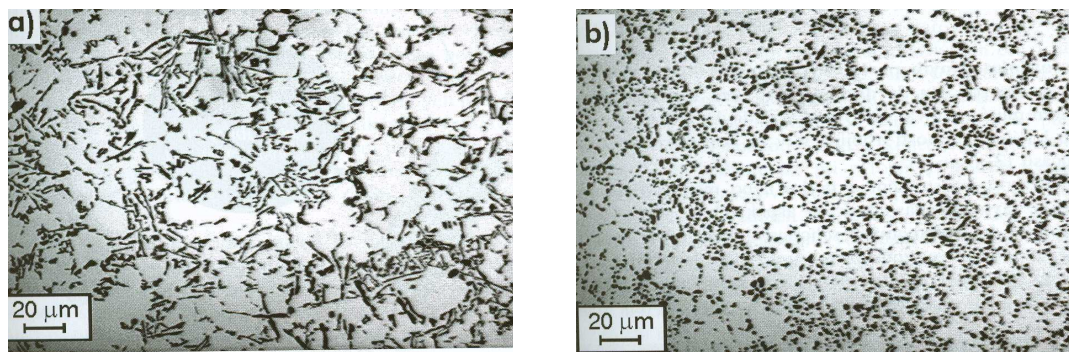


Obr. 2-13 Závislost tvrdosti vytvrzované slitiny AlSi10Mg na teplotě ohřevu a čase vytvrzování [7]

Z obr. 2-13 je patrný různý průběh křivek, které odpovídají různým teplotám. Slitina AlSi10MgMn je velmi citlivá na správné podmínky precipitačního procesu.

Vyšší teploty ohřevu pro rozpad přesyceného tuhého roztoku (umělé stárnutí), paradoxně mají za následek zhoršení hodnot mechanických vlastností.

Na obr. 2-14 je pro ilustraci uvedena struktura slitiny hliníku bez vytvrzování a po vytvrzování.



Obr. 2-14 Struktura hliníkové slitiny před precipitačním vytvrzením (a) a po vytvrzení (b) [7]

2.3 Technické uplatnění precipitačního vytvrzování slitin hliníku [1]

Precipitační vytvrzování má značný význam pro výrobu strojních součástí a konstrukčních dílů ze slitin hliníku. Slitiny Al se uplatňují především při výrobě automobilových dílů, jak litých, tak tvářených výrobků.

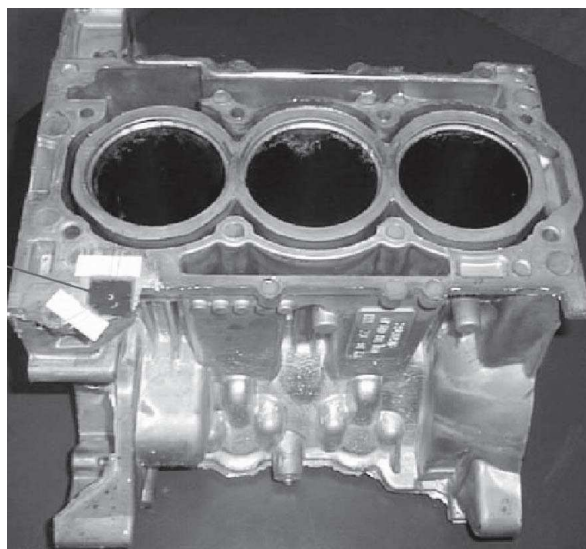
Odlitky ze slitin hliníku se odlévají především vysokotlakým nebo nízkotlakým způsobem, gravitačně do kovových forem popř. gravitačně do pískových forem.

Z používaných slévarenských slitin je vytvrditelná slitina AlSi9Cu3 a AlSi7Cu3Mg, jejich chemické složení je patrné z tab. 2-10.

Tab. 2-10 Chemické složení slitiny AlSi9Cu3 a AlSi7Cu3Mg [10]

AlSi9Cu3 %	Si	Fe	Cu	Mn	Mg	Cr	Ni	Zn	Pb	Sn	Ti
	8,0 11,0	1,3	2,0 4,0	0,55	0,05 0,55	0,15	0,55	1,2	0,35	0,25	0,25
AlSi7Cu3Mg %	Si	Fe	Cu	Mn	Mg	Cr	Ni	Zn	Pb	Sn	Ti
	6,5-8,0	0,8 (0,7)	3,0 4,0	0,20 0,65	0,30 0,60	/	0,30	0,65	0,15	0,10	0,10 0,20

Slitina AlSi9Cu3 se používá k výrobě bloků motorů ve firmě Škoda-Auto, a.s. Mladé Boleslavi na výrobu bloků spalovacích motorů pro automobil Škoda-Fabia 1,2 HTP, který je na obr. 2-12.



Obr. 2-15 Blok spalovacího motoru typ ŠKODA. Fabia 1,2 THP (slitina AlSi9Cu3), vyroben vysokotlakým litím [8]

Disky kol automobilů se vyrábí ze slitin AlSi7Cu3Mg , nízkotlakým litím. Odlitky se pak vytvrzují. Disk kola můžeme vidět na obr. 2-13.



Obr. 2-16 Disk kola (Slitina AlSi7Cu3Mg), vyrobeno nízkotlakým litím [9]

Lité disky kol - jejich předností je nejen elegantnější vzhled, ale samozřejmě jejich užité vlastnosti. Hliníkové ráfky jsou lehčí než klasické ocelové disky, takže nabízí použití většího průměru a šířky, než by odpovídalo standardní velikosti plechového kola. Tím se nám umožňuje použití větších, širších a nižších pneumatik. Větší průměr nám zlepšuje komfort jízdy a větší šířka má vliv na to, že nám vozidlo lépe sedí v zatáčkách. Tyto vlastnosti jsou pouze při suché vozovce a to z důvodu, že při snížené přilnavosti se naopak tyto výhody ztrácejí spíše mizí. Ráfky z lehkých hliníkových slitin nekorodují, takže jejich životnost je přibližně stejná jako je životnost nového automobilu.

Dále se také používají litá kola ze slitiny hořčíku Mg-Al-(Zn,Mn), která mají hlavní použití pro výrobu závodních automobilů. Těmto typům kol se často říká elektrony a je to z toho důvodu, že obchodní název této slitiny je elektron. Tato slitina obsahuje 7-10% Al. Tato slitina musí vykazovat velmi dobré mechanické vlastnosti, které lze ovlivňovat za pomoci modifikace, rychlosti ochlazování a tlaku při lití. Litá kola se například vyrábí ze slitiny MgAl6Mn s mechanickými vlastnostmi $R_m = 190-230 \text{ MPa}$, $A_5 = 5-8\%$ technologií gravitačního lití do pískových forem nebo častěji tlakovým litím do kovových forem.

Postup vytvrzování probíhá tak, že se kola zahřívají v peci na teplotu 490°C , tj. na homogenizační teplotu. Ohřev v peci trvá zhruba 4 hodiny, pak následuje rychlé ochlazení ve vodě o teplotě 50°C . Jak je výše uvedeno v tomto okamžiku vzniká přesycený tuhý roztok α . Z důvodu, že disky kol jsou důležité konstrukční díly a na jejich kvalitě a mechanických vlastnostech závidí bezpečnost provozu automobilu, je důležité, aby celý vytvrzovací proces proběhl před expedicí disku z firmy. Proto dále následuje tak zvané umělé stárnutí, kdy urychlujeme rozpad přesyceného tuhého roztoku. Proto se disky vkládají do pece na dobu 2 až 3 hodin. Výsledkem jsou vyšší mechanické hodnoty vyráběných disků kol.

V souvislosti s výrobou disků kol je nutno uvést, že celé výrobě kola předchází návrh designu, podle něj se ztvární na speciálním Cad softweru první 3D model, který se musí schválit, případně provést úpravy. Když dojde ke schválení tak je vyhotoven model nejprve z plastu nebo umělého dřeva, který se opět musí schválit z hlediska designu. Dalším z faktorů před samotnou výrobou je optimalizace, která se provádí pomocí složitých výpočtů zohledňující veškerá namáhání, ke kterým u kol

dochází. Zároveň se také navrhuje kovová forma do které se bude výrobek tlakově lít s využitím simulace teplotních polí pro získání ideálních podmínek pro chladnutí odlitku.

V současné době již existuje metoda výroby litých kol z lehkých slitin a to ne litím, ale pomocí tváření a kování, kdy se hliníkový válec nahřeje na teplotu 400°C a třemi kovacími procesy při tlaku 6000 až 8000 tun dojde v vytlisování do podoby kotouče. Následně dochází ke tvarování za studena. S použitím extrémně přesných nástrojů se kolo soustruží a frézuje do konkrétní podoby. Tyto kola se vyznačují vysokou pevností a i výbornými jízdními vlastnostmi.

2.4 Shrnutí zákonitostí pro precipitační vytvrzování slitin hliníku

Precipitační vytvrzování slitin hliníku je určitý druh tepelného zpracování, kterým se zvyšují mechanické vlastnosti vytvrzovací slitiny hliníku. Pro vytvrzování těchto slitin je důležité, aby slitiny byly schopné vytvářet tak zvanou intermediální fázi. To jsou například Al_2Cu , Mg_2Si , Al_2CuMg . Například binární slitiny hliníku, tak zvané siluminy, které se používají k výrobě odlitků tuto fázi nevytváří, čili jejich vytvrzování by bylo bez efektu, nevytváří intermediální fázi, proto se nevytvřují. Jiná situace nastává u slitiny typu Al-Si-Cu. Tato slitina obsahuje intermediální fázi, proto slitiny tohoto typu lze vytvrzovat.

Z hlediska fyzikálně – metalurgického pohledu je velmi důležitý rozpad přesyceného tuhého roztoku. Je to technicky nejdůležitější fázová přeměna v tuhém stavu, která se právě využívá při tepelném zpracování – vytvrzování vhodných slitin hliníku.

Tuhý roztok se rozpadá, přesytí-li se při změně teploty rozpouštěnou složkou. Změna rozpustnosti tuhého roztoku při změnách teploty je základním předpokladem pro realizaci této fázové přeměny. Poklesem teploty (tj. rychlým ochlazením hliníkového dílu ve vodě) se tuhý roztok o původní koncentraci stává nestabilním (je přesycený o přísadu, která se po určité době začne vylučovat). To říkáme, že dochází k rozpadu přesyceného tuhého roztoku a současně se vylučuje přísada.

Z hlediska atomů dochází k tomu, že atomy přísady se přemisťují z krystalické mřížky tuhého roztoku a v souladu s rovnovážnými podmínkami dané soustavy

(v případě Al-Si-Cu) vytváří se chemická sloučenina Al_2Cu , která precipituje uvnitř zrna tuhého roztoku α . U slitin typu Al-Cu oblasti precipitátů označujeme jako Guinier-Prestonovy zóny.

Výsledkem je růst tvrdosti tohoto zpracování slitiny hliníku.

3. Závěr

Hliník patří mezi významné neželezné kovy, avšak v čistém stavu nemá potřebné mechanické vlastnosti. Z toho důvodu se nedá použít pro konstrukční účely. Naštěstí existují slitiny hliníku, které mají lepší mechanické vlastnosti než čistý hliník. Pro dosažení maximálních mechanických vlastností se používá tepelné zpracování, které se také nazývá precipitační zpevňování (vytvrzování). Vytvrzování lze provádět pouze u těch slitin hliníku, u kterých se vytváří intermediální fáze. U takto vyloučené intermediální fáze dochází po čase k vytvrzení neboli rozpadu tuhého roztoku (precipitaci). Na precipitační vytvrzování je nutné volit vhodnou slitinu. Ze slévárenských slitin hliníku jsou to slitiny především typu Al-Si-Cu, Al-Si-Mg, které vytváří chemickou sloučeninu Al_2Cu , Al_2Mg , respektive intermediální fáze, které mohou při vytvrzování precipitovat.

V této souvislosti je třeba upozornit, že ne všechny slitiny hliníku jsou vytvrditelné. Vytvrditelné jsou slitiny typu Al-Cu-Mg, Al-Mg-Si, Al-Zn-Mg, Al-Si-Cu, atd. Naopak nevytvrditelné jsou slitiny Al-Mg, Al-Mg-Mn, Al-Mn, Al-Si, atd.

Precipitační vytvrzování odlitků ze slitin hliníku je nutné provádět v těchto dílčích krocích :

1. Ohřev na homogenizační teplotu (nesmí překročit teplotu solidu taveniny).
2. Rychlé ochlazení ve vodě (teplota vody 20 až 50°C).
3. Vlastní vytvrzování – tj. z fyzikálně-chemického pohledu rozpad přesyceného tuhého roztoku. Může se provádět při teplotě vyšší zhruba 150°C (odlitky jsou ohřáté v peci), pak tento způsob označujeme jako vytvrzování umělé. Nebo se odlitky ponechají na vzduchu (bez dalšího ohřevu), to je vytvrzování přirozené.

Tímto způsobem se zpracovávají odlitky od kterých vyžadujeme vyšší mechanické vlastnosti, především pevnost v tahu a tvrdost. Tímto způsobem lze zvýšit tvrdost až cca o 35 % a pevnost v tahu cca dvojnásobně.

4. Seznam použité literatury

- [1] MICHNA, Štefan, et al. *Encyklopedie Hliníku*. Prešov : Adin, 2005. 722 s.
- [2] SEDLÁČEK, Vladimír. *Neželezné kovy a slitiny*. Praha : SNTL, 1979. 396 s.
- [3] PLUHAR, Jaroslav, et al. *Nauka o materiálech*. Praha : SNTL, 1989. 541 s.
- [4] PLACHÝ, Jan, MILAN, Němec, BEDNÁŘ, Bohumír. *Teorie slévání*. Praha : Ediční středisko ČVUT, 1990. 108 s.
- [5] *Hliník a jeho slitiny* [online]. 2006 [cit. 2009-04-15]. Dostupný z WWW: <<http://www.benjamin.ic.cz/hlinik.slitiny.pdf>>.
- [6] *Výroba hliníku na Islandu* [online]. 2007 [cit. 2009-04-15]. Dostupný z WWW: <<http://www.spszr.cz/dokumenty/island/vyroba-hliniku-na-islandu.doc>>.
- [7] NOVÁ, Iva, et al. Slévárenské vlastnosti. In *Charakteristika, vlastnosti, metalurgie a použití slévárenských slitin hliníku*. Liberec : [s.n.], 2006. s. 2-102.
- [8] BAŘINOVÁ, D: Rozbor termofyzikálních parametrů ovlivňujících experimentální měření a simulaci odlitků pro automobilový průmysl“. [Doktorská práce]. FSI – VUT Brno 2006.
- [9] *Lita kola značky AEZ* [online]. 2007 [cit. 2009-05-18]. Dostupný z WWW: <<http://cars.majestat.cz/menu/lita-kola-znacky-aez>>.
- [10] *UNEKO, spol. s r. o. - Přehled odlévaných materiálů* [online]. 2006 [cit. 2009-05-18]. Dostupný z WWW: <<http://www.uneko.cz/cz.php/slevarna/prehled-odlevanych-materialu/AlSi9Cu3>>.

Prohlášení

Byl jsem seznámen s tím, že na mou bakalářskou práci se plně vztahuje zákon č. 121/2000 Sb. o právu autorském, zejména § 60 – školní dílo.

Beru na vědomí, že Technická univerzita v Liberci (TUL) nezasahuje do mých autorských práv užitím mé bakalářské práce pro vnitřní potřebu TUL.

Užiji-li bakalářskou práci nebo poskytnu-li licenci k jejímu využití, jsem si vědom povinnosti jsem si vědom informovat o této skutečnosti TUL; v tomto případě má TUL právo ode mě požadovat úhradu nákladů, které vynaložila na vytvoření díla, až do jejich skutečné výše.

Bakalářskou práci jsem vypracoval samostatně s použitím uvedené literatury a na základě konzultací s vedoucím diplomové práce a konzultantem.

Datum 5. června 2009

Podpis

Declaration

I have been notified of the fact that Copyright Act No. 121/2000 Coll. applies to my thesis in full, in particular Section 60, School Work.

I am fully aware that the Technical University of Liberec is not interfering in my copyright by using my thesis for the internal purposes of TUL.

If I use my thesis or grant a licence for its use, I am aware of the fact that I must inform TUL of this fact, in this case TUL has the right to seek that I pay the expenses invested in the creation of my thesis to the full amount.

I compiled the thesis on my own with the use of the acknowledged sources and on the basis of consultation with the head of the thesis and a consultant.

Date 5. July 2009

Signature